2П

УДК 681.518.52:622.53

В.Н. Павлыш, Хасер Исмаил Даех
Донецкий национальный технический университет, Украина
Украина, 83000, г. Донецк, ул. Артема, 58

Математическое моделирование в системе автоматического управления процессом пневмогидродинамического воздействия на подземные массивы

V.N. Pavlysh, Khaser Ismail Dayekh
Donetsk National Technical University, Ukraine
Ukraine, 83000, c Donetsk, Artema st., 58

The Mathematical Modeling in the System of Automatic Control of Process of Pneumohydrodynamic Action on Underground Massive

В.М. Павлиш, Хасер Ісмаіл Даєх
Донецький національний технічний університет, Україна
Україна, 83000, м. Донецьк, Артема, 58

Математичне моделювання в системі автоматичного керування процесом пневмогідродинамічної дії на підземні масиви

Рассматривается задача построения системы автоматического управления технологическим процессом пневмо- и гидродинамического воздействия на газонасыщенный подземный угольно-породный массив как способа направленного изменения его состояния. Для описания процесса предлагается математическая модель, в основу которой положена система нелинейных уравнений с краевыми условиями, определяемыми технологической схемой.
Ключевые слова: процесс, математическая модель, управление, массив, система.

The problem of construction of the system of automatic control of process of pneumatic and hydrodynamic action on gas contained underground coal-rock massive as a way of directed changing of its status is considered. For describing of process the mathematic model, based on the system of nonlinear equations with technologically defined boundary conditions is proposed.
Key words: process, mathematical model, control, massive, system.

Розглядається завдання побудови системи автоматичного керування технологічним процесом пневмо- та гідродинамічної дії на газонасичений підземний вугільно-порідний масив як засобу спрямованої зміни його стану. Для опису процесу пропонується математична модель, в основу якої покладено систему нелінійних рівнянь з крайовими умовами, що визначаються технологічною схемою.
Ключові слова: процес, математична модель, керування, масив, система.

Введение

Актуальность задачи. При разработке месторождений полезных ископаемых, в частности, газоносных пластов, в процессе эксплуатации месторождения возникает проблема повышения интенсивности извлечения полезного продукта. Одним из основных способов решения проблемы является целенаправленное изменение свойств массива путем внешнего воздействия, в частности, пневмогидродинамической обработки. Качественная реализация воздействия обеспечивается с помощью автоматического управления его параметрами, при этом состояние процесса представляется с помощью математической модели. При проектировании системы управления возникает необхо-

димость использования элементов искусственного интеллекта, в частности, элементов нечеткой логики. В этой связи тема работы является актуальной.

Цель работы – обоснование структуры математической модели и алгоритма управления процессом пневмогидродинамического воздействия на газонасыщенный породный массив.

Техническая постановка задачи

Пневмогидродинамическая обработка подземных нефтегазоносных массивов осуществляется путем высоконапорного нагнетания аэрированной жидкости через скважины, пробуренные с поверхности на продуктивный горизонт для изменения его состояния с целью интенсификации выхода полезного продукта. Кроме того, воздействие на угольный пласт осуществляется с целью его гидрорасчленения как метод предварительной дегазации, вызывающий активизацию выделения метана.

На рис. 1 приведено схематическое изображение технологии воздействия на пласт через скважину, пробуренную с поверхности.

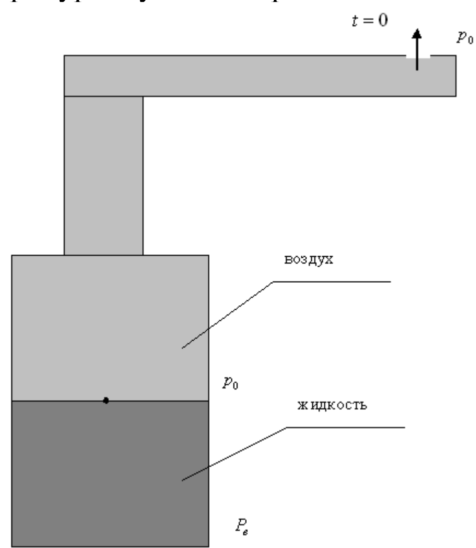


Рисунок 1 – Схема пневмогидродинамического воздействия на пласт через скважину, пробуренную с поверхности

Анализ результатов выполненных теоретических разработок в области математического моделирования процесса

Сходство основных закономерностей процессов движения жидкостей и газов в угле и горных породах позволяет использовать для этих исследований разработки в области теории фильтрации в нефтегазовых коллекторах и грунтах.

Основные модели напорной фильтрации жидкостей в горных породах описывают жесткий, упругий и нелинейно-упругий режимы для пористых и трещиновато-пористых сред. Жесткий режим фильтрации представляет собой движение несжимаемой жидкости в недеформируемой пористой среде. В общем случае, при наличии в системе источников или стоков этот режим описывается уравнением Пуассона относительно давления [1]:

$$\Delta P = f, \tag{1}$$

где P– давление жидкости;

f – функция источника (стока), учитывающая свойства среды и фильтрующейся жидкости.

Упругий режим соответствует нестационарному изменению давления слабосжимаемой жидкости в малодеформируемой пористой среде, когда жидкость и фильтрующая среда подчиняются закону Гука [1], [2]:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \chi \Delta P, \tag{2}$$

где $\chi = \dfrac{k}{\mu\left(n_э \beta_{ж} + \beta_c\right)}$ – коэффициент пьезопроводности;

k – коэффициент проницаемости среды;

$n_э$ – эффективная пористость;

μ – вязкость жидкости;

$\beta_{ж}, \beta_c$ – коэффициенты сжимаемости соответственно жидкости и пористой среды.

Уравнение (1) не учитывает изменение фильтрационных характеристик пористой среды в процессе ее деформации. В работе [3] на основе экспериментальных данных получена линейная зависимость проницаемости и пористости среды, плотности и вязкости жидкости от давления получено уравнение нелинейно-упругой фильтрации жидкости в пористой среде, по форме сходное с уравнением (2):

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \chi div\{[1 + \alpha(P - P_0)]gradP\}, \tag{3}$$

где $\alpha = \beta_k + \beta_{ж} - \beta_\mu$,

$\beta_k, \beta_\mu, \beta_{ж}$ – коэффициенты, характеризующие зависимость проницаемости среды и вязкости жидкости от давления;

P_0 – пластовое давление.

В каждом конкретном случае для выбора одного из уравнений (1) – (3) необходимо исследование степени влияния давления на характеристики пористой среды и жидкости и специфики фильтрационного потока.

В реальных горных породах, представляющих интерес с точки зрения теории фильтрации, эффективная пористость представлена трещинами и порами с очень широким диапазоном зияния: от десятков ангстрем до миллиметров.

В работе [2] предложена система уравнений, описывающая процесс движения жидкости в трещиновато-пористой среде:

$$\left.\begin{aligned} &\frac{\partial(n_{э1}\rho)}{\partial t} + div(\rho v_1) - q = 0; \\ &\frac{\partial(n_{э2}\rho)}{\partial t} + div(\rho v_2) + q = 0; \\ &q = \rho\alpha(P_2 - P_1), \end{aligned}\right| \begin{aligned} &\frac{k_1}{\mu}\Delta P_1 = (\beta_{c1} + n_{э1}\beta)\frac{\partial P_1}{\partial t} - \alpha(P_2 - P_1) \\ &\frac{k_2}{\mu}\Delta P_2 = (\beta_{c2} + n_{э2}\beta)\frac{\partial P_2}{\partial t} - \alpha(P_2 - P_1) \end{aligned} \tag{4}$$

где $\beta_{c1}, \beta_{c2}, \beta$ – коэффициенты сжимаемости среды 1, 2 и жидкости;

индекс «1» относится к трещинам, индекс «2» – к блокам;

q – функция, характеризующая интенсивность обмена жидкостью между трещинами и блоками;

α – коэффициент, количественно характеризующий интенсивность обмена;

ρ – плотность жидкости;

v – скорость движения жидкости.

Как и при выборе режима фильтрации, выбор пористой или трещиновато-пористой модели осуществляется на основе исследования соответствующих свойств горных пород и специфики решаемых задач.

Кратко рассмотренные модели являются основными для исследования напорной фильтрации жидкости в горных породах. Существующие в настоящее время способы математического описания движения жидкости в угольных пластах основаны на этих моделях.

Построение адекватных моделей на основе известных моделей подобных или сходных процессов в первую очередь предполагает выделение существенных специфических особенностей рассматриваемой задачи.

К применению трещиновато-пористой модели для угольного массива также нужно подходить с учетом его специфических особенностей. В нефтегазовых коллекторах основной запас нефти (газа) сосредоточен в пористых блоках, кроме того, блоки имеют значительные размеры [2].

С точки зрения гидродинамики, особенностью процесса нагнетания жидкости в угольный пласт является то, что фильтрация происходит в среде, первоначально не заполненной жидкостью, тогда как большинство моделей напорной фильтрации построены для насыщенных жидкостью пористых сред. Учет этого факта приводит, во-первых, к нестационарности процесса фильтрации, во-вторых, к необходимости введения дополнительных условий для вычисления координат фронта движущейся жидкости, что существенно усложняет решение и ограничивает область применения модели.

Разработка математической модели пневмогидродинамического воздействия

Уравнения фильтрации жидкости и газа имеют вид [5]:

$$a_1 \frac{\partial^2 P_1(x,t)}{\partial x^2} = \frac{\partial P_1(x,t)}{\partial t}; \quad 0 \le x \le l(t); \tag{5}$$

$$a_2 \frac{\partial^2 P_2^2(x,t)}{\partial x^2} = \frac{\partial P_2^2(x,t)}{\partial t}; \; l(t) \le x < \infty . \tag{6}$$

$$a_1 = \frac{kt_1}{\mu_1 \left(n_э + \dfrac{E_1}{E_c} \right)}; \; a_2 = \frac{kP_0}{\mu_2 \left[n + \dfrac{a_0 b R_г T}{(1 + a_0 P_0)^2} \right]}. \tag{7}$$

Здесь P_1, P_2 – соответственно давление жидкости и газа;

E_1, E_c – модули сжимаемости жидкости и пористой среды

n – абсолютная пористость;

a_0, b – константы изотермы Лэнгмюра;

$R_г$ – газовая постоянная;

T – абсолютная температура;

$l(t)$ – координата границы раздела «газ – жидкость», определяемая из уравнения

$$n_э \frac{dl}{dt} = -\frac{k}{\mu_1} \cdot \frac{\partial P_1(l,t)}{\partial x} . \tag{8}$$

Использование этой модели позволило показать, что для расчетов движения жидкости в массиве с учетом его свойств с достаточной для практики точностью можно использовать формулы жесткого режима и получить методику определения параметров нагнетания.

Постановка задачи для трещиновато-пористой среды, представляющая собой систему двух уравнений:

$$\frac{k}{\mu}\cdot\frac{\partial^2 P}{\partial x^2}=\frac{\partial W}{\partial t}; \qquad (9)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t}=\alpha P(W_0-W). \qquad (10)$$

с условиями

$$P(0,t)=P_H; \qquad (11)$$

$$P(x\geq l,t)=0; W(x\geq l,t)=0;$$
$$l=l(t); \qquad l(0)=0; \qquad (12)$$

$$\frac{dl}{dt}=-\frac{k}{\mu n_э}\frac{\partial P}{\partial x}\bigg|_{x=l}, \qquad (13)$$

где W – приращение влагонасыщения;

W_0 – максимальный прирост влаги;

α – коэффициент, характеризующий проницаемость блочной системы.

Условия (11) – (13), хотя и записаны по-разному, имеют одинаковый физический смысл, то есть выражают, в соответствии с законом Дарси, прямо пропорциональную зависимость скорости движения свободной поверхности потока жидкости от градиента давления на этой поверхности и позволяют явно вычислять ее координаты. Однако наличие в пласте зон с различной проницаемостью приводит к сложной, неправильной форме поверхности фронта, характеризующейся образованием «языков» влажности. Пример моделирования процесса в данных условиях приведен на рис. 2, где показаны линии равного давления в условиях неравномерной проницаемости (в процентах от давления на скважине).

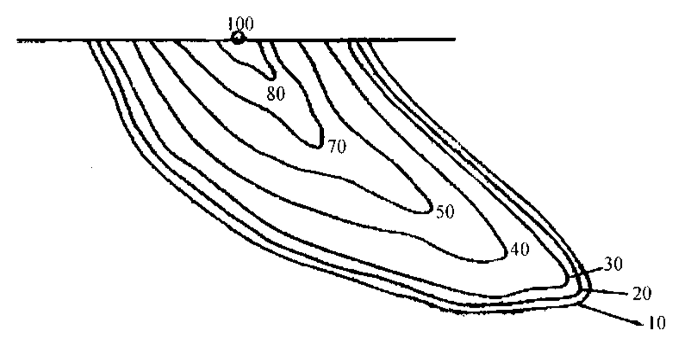


Рисунок 2 – Результаты моделирования воздействия через одиночную скважину, пробуренную с поверхности

Необходимость явного вычисления координат свободной поверхности потока жидкости в условиях анизотропного пласта и взаимодействия встречных потоков чрезвычайно усложняет, а иногда и делает практически неосуществимым решение задачи в плоскостной и пространственной постановке. К настоящему времени не разработаны

модели, позволяющие автоматически учитывать границу области фильтрации без явного ее выделения, дающие возможность эффективно решать задачи движения жидкости в сложном анизотропном пласте.

В [5] рассматриваются процессы гидродинамического воздействия на угольные пласты как основа способа добычи угля и предотвращения газодинамических явлений. Здесь рассмотрена краевая задача для уравнения пьезопроводности:

$$\frac{\partial P(x,t)}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 P(x,t)}{\partial x^2}. \quad (14)$$

Задача решается на конечных промежутках времени $T_H^i \le t \le T_K^i$, $i = 0,1,2,...$, и рассматривается процесс сброса давления. Аналитически получено решение в виде бесконечного ряда:

$$P_i(x,t) = \sum_{k=1}^{\infty} \left[\frac{\alpha_k}{b_i} + \frac{c_3}{c_2} + \frac{(-1)^k}{k\pi} \left(P_Г + P_C(T_H^i) \right) \right] e^{C_2(T_H^i - t)} \sin \frac{k\pi x}{b_i} - \\ - \sum_{k=1}^{\infty} \frac{c_3}{c_2} \sin \frac{k\pi x}{b_i} + P_C(t)(1 - \frac{x}{b_i}) + \frac{x}{b_i} P_Г. \quad (15)$$

Полученное выражение позволяет выполнять расчет точечных значений $P_i(x,t)$ с помощью компьютера.

Выводы

Установлены требования и предложена структура математической модели, учитывающей специфические особенности процессов, происходящих при внедрении газожидкостных смесей в трещиновато-пористую сплошную среду, в первую очередь – конечность скорости движения фронта рабочего агента. Модель предназначена к включению в состав системы автоматического управления процессом пневмогидродинамического воздействия на подземные массивы.

Показано, что необходимость явного вычисления координат свободной поверхности потока жидкости в условиях анизотропного пласта и взаимодействия встречных потоков чрезвычайно усложняет решение задачи в плоскостной и пространственной постановке, а возможным способом упрощения задачи является применение элементов нечеткой логики.

Литература

1. Павлыш В.Н. Физико-технические основы процессов гидравлического воздействия на угольные пласты : монография / В.Н. Павлыш, С.С. Гребенкин. – Донецк : ВИК, 2006. – 269 с.
2. Павлыш В.Н. Основы теории и параметры технологии процессов гидропневматического воздействия на угольные пласты : монография / В.Н. Павлыш, Ю.М. Штерн.– Донецк: “ВИК”, 2007.– 400с.
3. Павлыш В.Н. Развитие теории и совершенствование технологии процессов воздействия на угольные пласты : монография / Павлыш В.Н. – Донецк : РВА ДонНТУ, 2005. – 347 с.
4. Теоретические основы процессов комплексного гидропневматического воздействия на угольные пласты: Монография / [под общ. ред. Павлыша В.Н. ; Павлыш В.Н., Гребенкин С.С., Бондаренко В.И. и др.]. – Донецк : ВИК, 2006.– 273 с.
5. Гидродинамическое воздействие на газонасыщенные угольные пласты / [Булат А.Ф., К.К. Софийский, Силин Д.П. и др.]. – Днепропетровск, 2003. – 220 с.

Literatura

1. Pavlysh V.N. Fiziko-tekhnicheskiye osnovy protsessov gidravlicheskogo vozdeystviya na ugolniye plasty. Monografiya. Doneck: “VIK”. 2006. 269 s.
2. Pavlysh V.N. Osnovy teorii i parametry tekhnologii protsessov gidropnevmaticheskogo vozdeystviya na ugolnye plasty. Monografia. Doneck: “VIK”. 2007. 400 s.
3. Pavlysh V.N. Razvitiye teorii i sovershenstvovaniye tekhnologii protsessov vozdeystviya na ugolniye plasty. Monografiya. Doneck: RVA DonNTU. 2005. 347 s.
4. Pavlysh V.N. Teoretbcheskiye osnovy protsessov kompleksnogo gidropnevmaticheskogo vozdeystviya na ugolniye plasty. Doneck: “VIK”. 2006. 273 s.
5. Bulat K.K. Gidrodinamicheskoye vozdeystvie na gazonasyshchennye ugolnye plasty. Dnepropetrovsk. 2003. 220 s.

RESUME

V.N. Pavlysh, Khaser Ismail Dayekh

The Mathematical Modeling in the System of Automatic Control of Process of Pneumohydrodynamic Action on Underground Massive

The problem of construction of the system of automatic control of process of pneumatic and hydrodynamic action on gas contained underground coal-rock massive as a way of directed changing of its status is considered. For describing of process the mathematic model, based on the system of nonlinear equations with technologically defined boundary conditions is proposed.

The choice of porous and crack-porous model of massive makes on the base of investigation of corresponding properties of mine rock and specific features of given problems.

The construction of verified models using known models of similar or likeness processes at first time requires distinguishing specific particularity of considering question.

From the point of hydrodynamics the particularity of the process of liquid pumping in coal seam is the condition, that flowing is going in surrounding, contains no liquid before, but most of models of pumping was constructed for liquid contained porous massive.

This fact leads us to non standing of process and to necessity of including additional conditions for calculation of coordinates of boundaries of flowing liquid, that makes solution more difficult.

The existing of zones of different penetrating provides complicated curved form of surface of liquid flowing boundary.

The construction of mathematic model with specific features is necessary for investigation of processes of flowing liquid and gas in porous-crack massive in conditions of interaction of moving streams.

The important role of mathematical modeling takes place for solution of the problem of final stage of action, provides such algorithm, that helps to reduce negative influence for ecological conditions.

Статья поступила в редакцию 13.11.2012.